中国生态农业学报 2016 年 8 月 第 24 卷 第 8 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Aug. 2016, 24(8): 1059−1070

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160199

基于 HYDRUS-1D 模型的华北低平原区不同微咸水利用模式下土壤水盐运移的模拟*

何康康[1,2] 杨艳敏[1**] 杨永辉[1]

(1. 中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室/中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 华北低平原区深层地下水的不断超采不仅造成淡水资源的枯竭，还引发了地面沉降、土壤盐渍化等一系列生态环境问题。微咸水在农业上的利用已成为缓解水资源危机的研究重点。为了研究不同咸水灌溉模式的可持续性，本文以华北低平原区的河北省南皮县为例，利用 Hydrus-1D 模型，基于 8 种不同微咸水灌溉方案，模拟 2008—2013 年 6 年冬小麦–夏玉米轮作制度下，2 m 土体水盐通量变化。模拟结果表明，土体剖面盐分积盐区主要集中在下层土壤(100~200 cm)；上层土壤(0~100 cm)溶液盐分浓度大部分时间保持在 2 g·L^{-1} 左右，能保证作物正常生长；但土壤剖面盐分浓度在冬小麦灌浆末期出现峰值且随灌水盐分浓度增加而逐渐升高。土体盐分充分淋洗的关键在于降雨强度，7 月份降雨强度是土体脱盐与否的主要影响因素；同时，在丰水年型夏玉米播种后结合出苗水适当灌溉洗盐对土体达到有效脱盐起到重要作用。本文通过综合分析水文年型、土壤剖面盐分的动态分布特征以及结合夏玉米出苗水的洗盐淡水用量 3 方面因素对土壤盐分迁移的影响，提出华北低平原区两种适宜的微咸水灌溉制度：(1)冬前浇灌小于 2 g·L^{-1} 的冬小麦越冬水，春后在冬小麦拔节期浇灌一次 2~4 g·L^{-1} 微咸水；(2)冬前不灌越冬水，春后分别在冬小麦拔节期和灌浆期浇灌 2 g·L^{-1} 微咸水。两种灌溉制度年均结合夏玉米出苗水的洗盐淡水用量和总耗水量分别为 60~70 mm 和 250~260 mm。本文结果旨在为华北低平原区微咸水利用的节水潜力及其可持续性提供理论指导。

关键词 微咸水利用 灌溉模式 Hydrus-1D 模型 水盐运移 水文年型 冬小麦–夏玉米轮作
中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)08-1059-12

HYDRUS-1D model simulation of soil water and salt movement under various brackish water use schemes in the North China Lowplain*

HE Kangkang[1,2], YANG Yanmin[1**], YANG Yonghui[1]

(1. Key laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-saving Agriculture / Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Freshwater resource in the North China Lowplain is nearly been depleted due to continuous overexploitation of deep groundwater resources. This has led to a series of ecological and environmental problems, including land subsidence and soil salinization. The use of brackish water in agriculture to alleviate water crisis in the region has become the new focus of research. In order to determine the sustainability of various irrigation modes of saline water, this study used the Hydrus-1D model to simulate eight different brackish water irrigation schemes in Nanpi County. The model simulated water and salt fluxes in the 0–2 m soil layer in the winter wheat-summer maize crop rotation system for the period of 2008–2013. The

* 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目(KFJ-EW-STS-057-3)资助
** 通讯作者：杨艳敏，研究方向为作物模型与农业耗水估算。E-mail: ymyang@sjziam.ac.cn
何康康，主要研究方向为生态水文。E-mail: kkhe@ sjziam.ac.cn
收稿日期: 2016–03–01 接受日期: 2016–04–19

* Supported by the Science and Technology Service Network (STS) Program of Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-057-3)
** Corresponding author, E-mail: ymyang@sjziam.ac.cn
Accepted Mar. 1, 2016; accepted Apr. 19, 2016

simulation results of soil salinity profile distribution showed that the 100–200 cm subsoil layer was the main salt accumulation zone. The upper 0–100 cm soil layer was lower in salt solution concentration with 2 g·L^{-1} salt solution in most time, which generally ensured normal growth of crops. Soil profile salinity concentration peaked at late winter wheat grain-filling stage. Peak salinity increased with increasing salt concentration of irrigation water. Leaching soil salt in the study area depended mainly on rainfall intensity, especially in July when precipitation was heaviest. Proper leaching of salt after sowing corn in wet years significantly enhanced soil desalination. Based on comprehensive analysis of the effects of three tested factors (hydrological year type, dynamic distribution of soil profile salinity and soil salt migration/leaching), the paper proposed two suitable brackish water irrigation schemes in the North China Lowplain. 1) Pre-winter irrigation of brackish water with less than 2 g·L^{-1} salt concentration combined irrigation at jointing stage with 2–4 g·L^{-1} brackish water. 2) Without pre-winter irrigation, wheat was irrigated at jointing and grain-filling stage with 2 g·L^{-1} brackish water. The amount of freshwater used to leach soil salt at summer seedling stage and the total water consumption of the winter wheat-summer maize system under the above two irrigation schemes were 60–70 mm and 250–260 mm, respectively. This research provided the theoretical basis of water-saving potential through the use of brackish water for sustainable use of the limited water resources in the North China Lowplain.

Keywords Blackish water use; Irrigation scheme; Hydrus-1D model; Water and salt movement; Hydrological year; Winter wheat-summer maize crop rotation

华北平原是我国重要的粮食产区，同时也是水资源严重缺乏的地区。地下水资源的大量超采引起了地下水污染、地面沉降、海水入侵、土壤盐渍化等一系列生态环境危机[1]。为了缓解日益突出的用水危机，开发各种水资源、提高水资源利用效率以及制定水资源可持续策略等已成为目前研究的重要课题。在半干旱地区，浅层地下咸水、微咸水具有较大的开发利用潜力，微咸水资源用于农业灌溉也越来越受到重视，尤其在淡水资源短缺地区已成为重要的节水对策。河北地区微咸水、咸水可开采资源量每年近 42 亿 m^3，占地下水总开采资源总量近 36%[2]，增大微咸水资源的开发利用率并用于农业灌溉，对于保障水资源可持续利用及华北低平原区农业可持续发展具有重要作用。

应用微咸水灌溉尚需要以试验、模拟等手段为基础的理论和技术指导。目前，微咸水灌溉技术已在很多干旱地区得到应用，适宜的灌溉制度能够达到节水增产的目的。已有的灌溉试验表明灌水量、灌溉水质是影响土壤积盐的主要因素，微咸水灌溉的目标就是控制根区盐分的累积[3]。适宜的微咸水灌溉对作物的生长发育有一定的促进作用。陈素英等[4]在河北省南皮的试验研究表明，拔节期用 2 g·L^{-1} 和 4 g·L^{-1} 微咸水灌溉比雨养作物分别增产 16.7%和 7.4%，但是小麦季的积盐会造成后茬作物玉米的减产，微咸水灌溉应考虑作物种类和灌水时间。试验研究[5–7]显示小麦萌芽期和孕穗期对盐分比较敏感而灌浆成熟期和拔节期相对影响较小，并且应控制土壤盐分在 6 dS·m^{-1}[8]以下。玉米则对盐分胁迫非常敏感，特别是在萌芽期、苗期阶段[9]。在土壤盐分为 1.7 dS·m^{-1}[7]以上玉米开始受害，在 5.9 dS·m^{-1} 时玉米产量减少一半[10]。因此，应根据不同的作物种类、土壤特性及咸水资源确定合理的灌溉制度，既要满足作物的需水量又要有效地控制土壤盐分的累积。

不同微咸水灌溉情景下农田土壤水盐的动态变化一直是研究的难点。目前, Hydrus-1D 模型被广泛应用于土壤水分和溶质运移的模拟研究[11–12]，通过模拟来加强机理过程的认识。Hydrus-1D 模型是由美国盐改中心开发的用于模拟变饱和多孔介质水分、热量、溶质迁移的数值模型，能够对大气过程(蒸散、降雨、灌溉)、土壤水分及溶质运移、作物根系吸收、地下水水位变化等过程进行综合模拟。具有多种边界条件设置，并提供了大量的参数数据库作为参考[13]。本文利用 Hydrus-1D 模型模拟在不同的微咸水灌溉情景下，冬小麦–夏玉米轮作下的土壤水盐通量变化。本文通过研究不同水文年型、灌水盐分浓度及结合夏玉米出苗水的洗盐用水量对土壤盐分运移的影响，明确了微咸水灌溉下土壤剖面盐分累积规律和土体盐分淋洗周期，提出了华北低平原区适宜的两种微咸水灌溉方案，从而为华北低平原区微咸水利用的节水潜力及其可持续性提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域位于河北省南皮县(北纬 37°50′~38°11′，东经 116°32′~117°02′，海拔 7~12 m)。土壤类型主要是潮土、盐化潮土和脱潮土，其中盐化潮土占 22%，土壤质地以壤土为主[14]，土壤含盐量为 0.8~1.5 g·kg^{-1}，

土壤容重为 1.42 g·cm^{-3}, 田间持水量为 24.1%[15]。该地区属近滨海缺水盐渍化类型区, 灌溉用地面水稀少, 浅层地下咸水资源丰富。南皮县属于古河道平原地下水系统[2], 地下水埋深在 5~7 m, 其中浅层地下水资源小于 2 g·L^{-1} 占 18%, 2~3 g·L^{-1} 占 33%, 3~5 g·L^{-1} 占 24%, 大于 5 g·L^{-1} 占 25%[16]。该地区年均降水量 550 mm, 是典型的暖温带半湿润大陆季风气候区, 春秋干旱, 夏季多雨易涝, 土壤具有明显的季节性积盐或脱盐现象。

1.2　模型描述

本文采用美国农业部盐渍土实验室研发的模拟饱和–非饱和土壤水、热、溶质运移的 Hydrus-1D 软件, 该软件主要包括水分运移、根系吸水、盐分运移 3 个模块。

1.2.1　水分运动基本方程

以地表为基准面, 垂直一维水分运动基本模型[17]可表示为:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right]-S(h) \tag{1}$$

式中: θ表示土壤体积含水率(cm^3·cm^{-3}); t 为时间(d); K为非饱和水力传导系数(cm·d^{-1}); h 为基质势(cm); S 是作物根系吸水率(d^{-1}); z 是垂直坐标, 方向向上为正(cm)。

选用van-Genuchten-Mualem模型[18]确定土壤水分特征参数:

$$\theta(h)=\begin{cases}\theta_r+\dfrac{\theta_s-\theta_r}{\left[1+|\alpha h|^n\right]^m} & (h<0)\\ \theta_s & (h\geqslant 0)\end{cases} \tag{2}$$

$$K(h)=K_s S_e^l\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \tag{3}$$

其中: $$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\quad\left(m=1-\frac{1}{n},n>1\right) \tag{4}$$

式中: θ_s为土壤饱和体积含水率(cm^3·cm^{-3}); θ_r为土壤残余体积含水率(cm^3·cm^{-3}); h 为基质势(cm); K_s为饱和传导系数(cm·d^{-1}); S_e为有效饱和度; α为进气吸力的倒数(cm^{-1}); m 为水分特征曲线参数; n 为孔径分布参数; l 是空隙连通性参数, 一般取值为 0.5。

1.2.2　根系吸水方程

根系吸水模型采用 Feddes 模型[19]计算根系吸水速率, 即:

$$S(h)=\alpha(h)N(x)T_p \tag{5}$$

式中: $\alpha(h)$ 表示根系吸水胁迫系数; $N(x)$ 为标准化根系吸水分布函数, 描述根系吸水的空间变异; T_p 为作物潜在蒸腾速率(cm·d^{-1})。根系吸水胁迫系数由 Wesseling 等[20]提出的参数经验值确定, 如表 1 所示:

表 1　作物根系吸水方程参数
Table 1　Crop root uptake equation parameters

作物 Crop	h_0 (cm)	h_{opt} (cm)	h_{2H} (cm)	h_{2L} (cm)	h_3 (cm)
冬小麦 Winter wheat	0	–1	–500	–900	–16 000
夏玉米 Summer maize	–15	–30	–325	–600	–8 000

当土壤水势在饱和点 h_0 和萎蔫点 h_3 附近时作物吸水速率接近于 0, 当土壤含水率大于毛管破裂含水率(h_{2H} 或 h_{2L})而小于田间持水率 h_{opt} 时植物易吸收水分, 根系吸水系数接近于 1; h_{2H} 表示的是潜在蒸腾速率等于 0.5 cm·d^{-1} 时的土壤水势, h_{2L} 则是潜在蒸腾速率是 0.1 cm·d^{-1} 时的土壤水势。Root water uptake is assumed to be zero when pressure heads close to saturation (h_0). Root water uptake is also zero for pressure heads less than the wilting point (h_3). Water uptake is considered optimal and close to 1 when pressure heads between h_{opt} and h_{2H} (h_{2L}), pressure head h_{2H} for potential transpiration at 0.5 cm·d^{-1}, pressure head h_{2L} for potential transpiration at 0.1 cm·d^{-1}.

标准化根系吸水分布函数 $N(x)$计算方程如下[21]:

$$N(x)=\frac{N'(x)}{\int N'(x)dx} \tag{6}$$

式中: $N'(x)$为实测或模拟的根系分布函数, 反映根系在土壤剖面上的分布状况。作物根系生长采用线性生长函数, 冬小麦和夏玉米根系生长状况根据张喜英[22]试验研究确定。

1.2.3　盐分运动基本方程

模型以土壤可溶盐(惰性非吸附性溶质)为研究对象, 以土壤水矿化度为主要研究指标, 建立饱和–非饱和土壤溶质运移数学模型[21]:

$$\frac{\partial(\theta\cdot C)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[\theta\cdot D\left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)\right]-\frac{\partial(q\cdot C)}{\partial z} \tag{7}$$

式中: C 表示土壤溶液中盐分的浓度(mg·cm^{-3}), q 为水流通量(cm·d^{-1}), D 为水动力弥散系数(cm^2·d^{-1})。

1.2.4　模型输入

土壤水分运动的初始条件和边界条件[21]:

初始条件: $$h(z,t)=h_0(z,0) \tag{8}$$

上边界: $$-K\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)=q_0(0,t) \tag{9}$$

下边界: $$\frac{\partial h}{\partial z}=0 \tag{10}$$

土壤盐分运动的初始条件与边界条件[21]:

初始条件: $$C(z,t)=C_0(z,0) \tag{11}$$

上边界: $$-\theta D\frac{\partial C}{\partial z}+qC=q_0C_0 \tag{12}$$

下边界: $$\theta D\frac{\partial C}{\partial z}=0 \tag{13}$$

模拟的初始条件取野外经验值，初始含水率为田持量的 65%，盐分含量为 1 g·kg^{-1}。模型溶质运移上边界是由不同的灌水浓度确定的，水分运移上边界选取表层无积水的大气边界。潜在蒸散发(ET_p)、土壤潜在蒸发(E_p)和作物潜在蒸腾量(T_p)由气象条件以及叶面积指数求得。首先根据 Penman-Monteith 方程[23]计算作物参考蒸散(ET_0)，然后根据参考作物系数 K_c[24]计算作物的潜在蒸散量(ET_p)，最后，潜在蒸发量(E_p)和蒸腾量(T_p)根据 Beer's law 定律[25]进行计算:

$$T_p=ET_p\cdot\left(1+e^{-k\cdot LAI}\right) \tag{14}$$

$$E_p=ET_p\cdot e^{-k\cdot LAI} \tag{15}$$

式中: LAI 表示叶面积指数[26–27]; k 表示的是冠层的消光系数，反映的是太阳辐射在冠层中的衰减程度，小麦消光系数一般取值 0.60[28–29]，玉米消光系数为 0.438[30]。

本文取 2 m 土体作为模拟剖面，基于研究区地下水埋深常年在 5~7 m，因此不考虑地下水补给影响，并取自由排水作为下边界。模型模拟土壤深度为 0~200 cm，步长为天，设定最小时间步长和最大时间步长分别为 0.000 01 d 和 5 d。考虑根系主要分布在耕层，空间步长上密下疏。将 2 m 土体根据土壤质地划分为 3 层，利用 Hydrus-1D 模型中自带的 Rosseta 模块，输入各层土壤的粒径组成和容重，初步得到各层的土壤水力参数。并根据试验区 2004—2005 年土壤水盐数据进一步的校正，校准后的土壤水力参数如表 2 所示。

表 2 校准后的 van-Genuchten 模型特征参数

Table 2 Calibrated parameters of the van-Genuchten model

土层厚度 Soil depth (cm)	模型参数 Model parameter							
	Q_r (cm^3·cm^{-3})	Q_s (cm^3·cm^{-3})	α (1·cm^{-1})	n	K_s (cm·d^{-1})	l	D_{bulk} (g·cm^{-3})	D (cm^2·d^{-1})
0~20	0.043 7	0.393 80	0.010 8	1.359 2	37.54	0.5	1.42	5
20~60	0.074 8	0.470 59	0.007 8	1.293 2	26.66	0.5	1.42	20
60~200	0.075 8	0.451 67	0.009 3	1.246 1	24.55	0.5	1.42	5

Q_r 为土壤饱和体积含水率(cm^3·cm^{-3}), Q_s 为土壤残余体积含水率(cm^3·cm^{-3}), K_s 为饱和传导系数(cm·d^{-1}), α为进气吸力的倒数(cm^{-1}), n 为孔径分布参数, l 是空隙连通性参数; D_{bulk} 为土壤容重(g·cm^{-3}); D 为弥散系数。Q_r is saturated soil water content (cm^3·cm^{-3}); Q_s is residual soil water content (cm^3·cm^{-3}); K_s is saturated hydraulic conductivity (cm·d^{-1}); α is reciprocal of intake suction (cm^{-1}); n is pore size distribution parameter; l is pore connectivity parameter; D_{bulk} is bulk density (g·cm^{-3}); D is solute diffusion coefficient.

1.2.5 情景设计

据 1996—2014 年 19 年的降水资料分析，该区域丰水年(P=25%)降水量为 658.1 mm，平水年(P=50%)为 536.4 mm，枯水年(P=75%)为 446.8 mm。其中，2009 年、2012 年、2013 年属于丰水年型，2008 年、2010 年、2011 年属于平水年型。根据华北平原冬小麦生育期和夏玉米生育期耗水量分别在 400~450 mm 和 350~400 mm 之间[31]，而 2008—2013 年玉米生育期降雨量均在 400 mm 以上(表 3)，降雨能够满足玉米水分的需求。因此，该区域的灌溉研究主要是以冬小麦为对象，进行微咸水灌溉补给处理。虽然后茬玉米未进行微咸水灌溉，但前茬小麦土壤盐分的累积会对玉米形成减产效应[3]，一般情况下，玉米播后灌溉应结合出苗水进行洗盐，即玉米播后洗盐水用量同时也是出苗水用量。

表 3 2007—2013 年小麦和玉米生育期降雨量

Table 3 Precipitations of wheat and corn growth periods in 2007–2013 mm

年份 Year	小麦季 Wheat period	玉米季 Corn period	全年 Annual
2007—2008	145.5	442.4	623.8
2008—2009	112.6	554.7	779.5
2009—2010	124.8	433.4	536.4
2010—2011	63.9	406.3	509.8
2011—2012	110.6	511.5	674.7
2012—2013	114.4	559.8	658.1

根据不同灌溉时期本文设置 2 种情景，每个情景各有 4 个咸水灌溉处理，灌溉用水量和灌溉时期参照试验研究和实践经验确定[32]。情景 I 是对冬小麦进行春后 3 水灌溉：拔节期和灌浆期咸水灌溉，抽穗期淡水灌溉；夏玉米播后洗盐水用量根据玉米耐盐阈值(1.7 dS·m^{-1})设置，但最大不超过 120 mm。情景 II 是根据南皮“渤海粮仓”项目试区灌水经验进行设置，即冬小麦灌溉 3 水：越冬期固定 2 g·L^{-1} 微咸水灌溉，拔节期咸水灌溉，开花期淡水灌溉；夏玉米洗盐水用量固定为 70 mm。情景 I 和情景 II 冬小麦灌水定额均为 60 mm，灌溉咸水浓度设置 4 个处理，分别为 2 g·L^{-1}、3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1} 和 5 g·L^{-1}。具体灌水处理如表 4 所示。

表 4　河北南皮县小麦–玉米系统两种模拟情景不同时期的灌水水质和水量
Table 4　Irrigation water quality and amount of winter wheat-summer maize system at different growth stages under different modeling scenarios in Nanpi County, Hebei Province

项目 Item	情景Ⅰ Scenario Ⅰ				情景Ⅱ Scenario Ⅱ			
	小麦 Wheat			玉米 Corn	小麦 Wheat			玉米 Corn
灌溉时期 Irrigation time	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Grain filling	播前 Before sowing	越冬期 Winter period	拔节期 Jointing	开花期 Flowering	播前 Before sowing
水质 Water quality	咸水 Saline water	淡水 Fresh water	咸水 Saline water	淡水 Fresh water	咸水 Saline water	咸水 Saline water	淡水 Fresh water	淡水 Fresh water
矿化度 Salinity ($g \cdot L^{-1}$)	2~5	0.84	2~5	0.84	2	2~5	0.84	0.84
灌水量 Irrigation water amount (mm)	60	60	60	<120	60	60	60	70

模拟时段选择 2007—2013 年共 6 年时间，小麦季播种日期为 10 月 13 日，收割日期为 6 月 7 日，生育期为 238 d；玉米季播种日期为 6 月 10 日，收割日期为 10 月 2 日，生育期为 115 d。冬小麦越冬水、拔节水、抽穗水、开花水和灌浆水的灌水时间分别为 12 月 1 日、3 月上旬、4 月中旬、4 月下旬和 5 月中旬，具体灌水日期根据当月降雨时间和强度确定。

2　结果与分析

2.1　模型校准和验证

利用 2004 年和 2005 年南皮试验资料[33]分别作为校正和验证数据，对比了冬小麦主根区 0~40 cm 土壤水盐含量模拟值与实测值。

2004 年的试验设置[33]为：冬小麦生育期灌溉定额为 195 mm，分别为底墒水 60 mm(淡水 0.84 $g \cdot L^{-1}$)、拔节水 45 mm(淡水 0.84 $g \cdot L^{-1}$)、抽穗水 45 mm(淡水 0.84 $g \cdot L^{-1}$)和灌浆水 45 mm(微咸水 3 $g \cdot L^{-1}$)。试验主要关注的是主根区(0~40 cm)，因此分别在 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm 土层设置 4 个观测点，模拟值取观测点的加权平均值，校正结果如图 1 所示。结果表明，土壤含水率和土壤溶液含盐量在前两次灌水前后模拟值和实测值吻合较好，在灌浆期灌水前后则偏离较大。含水量的均方根误差和决定系数分别为 0.041 8 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ 和 0.726 4 $cm^3 \cdot cm^{-3}$，而含盐量的均方根误差和决定系数分别为 0.927 1 $g \cdot L^{-1}$ 和 0.502 3 $g \cdot L^{-1}$。

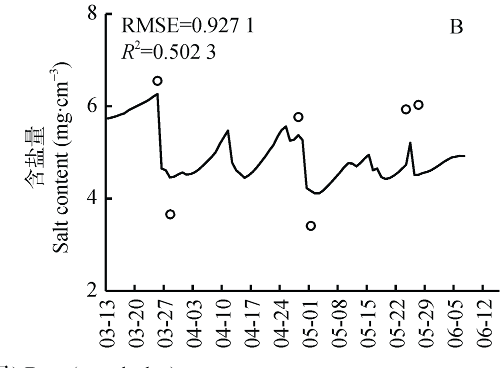


图 1　2004 年河北省南皮县冬小麦根区 0~40 cm 土壤水分(A)及盐分(B)模拟值与实测值的率定结果
Fig. 1　Comparison between the simulated and measured water contents (A) and salt contents (B) of 0–40 cm soil of winter wheat in Nanpi County, Hebei Province in 2004

2005 年试验设置[33]春后 3 水，即拔节水–抽穗水–灌浆水，根据灌水浓度设置 3 个处理，分别是：淡–淡–淡、淡–咸–咸和淡–淡–咸，每个处理的底墒水、淡水和咸水的浓度以及每次灌水量均同 2004 年试验设置。图 2 为验证结果，结果表明，含水量模拟效果比较好，均方根误差最小为 0.029，决定系数最大为 0.958 7；从含盐量的对比结果来看，虽然在灌浆期灌水前后模拟值与实测值偏差较大，但模型总体模拟效果比较好，大致反映了主根区土壤含盐量的动态变化趋势。总体来说，模型模拟效果可以接受，参数较为可靠，可用于实际模拟应用。

2.2　模拟结果分析

利用校验后的土壤水盐运移模型，分别模拟情景Ⅰ和情景Ⅱ的土壤水盐运移过程。

2.2.1　情景Ⅰ

1)灌溉用水量

情景Ⅰ中 4 个咸水灌溉处理的咸水用量都为 120 mm (两次灌溉时间分别为拔节期和灌浆期)，淡水用量

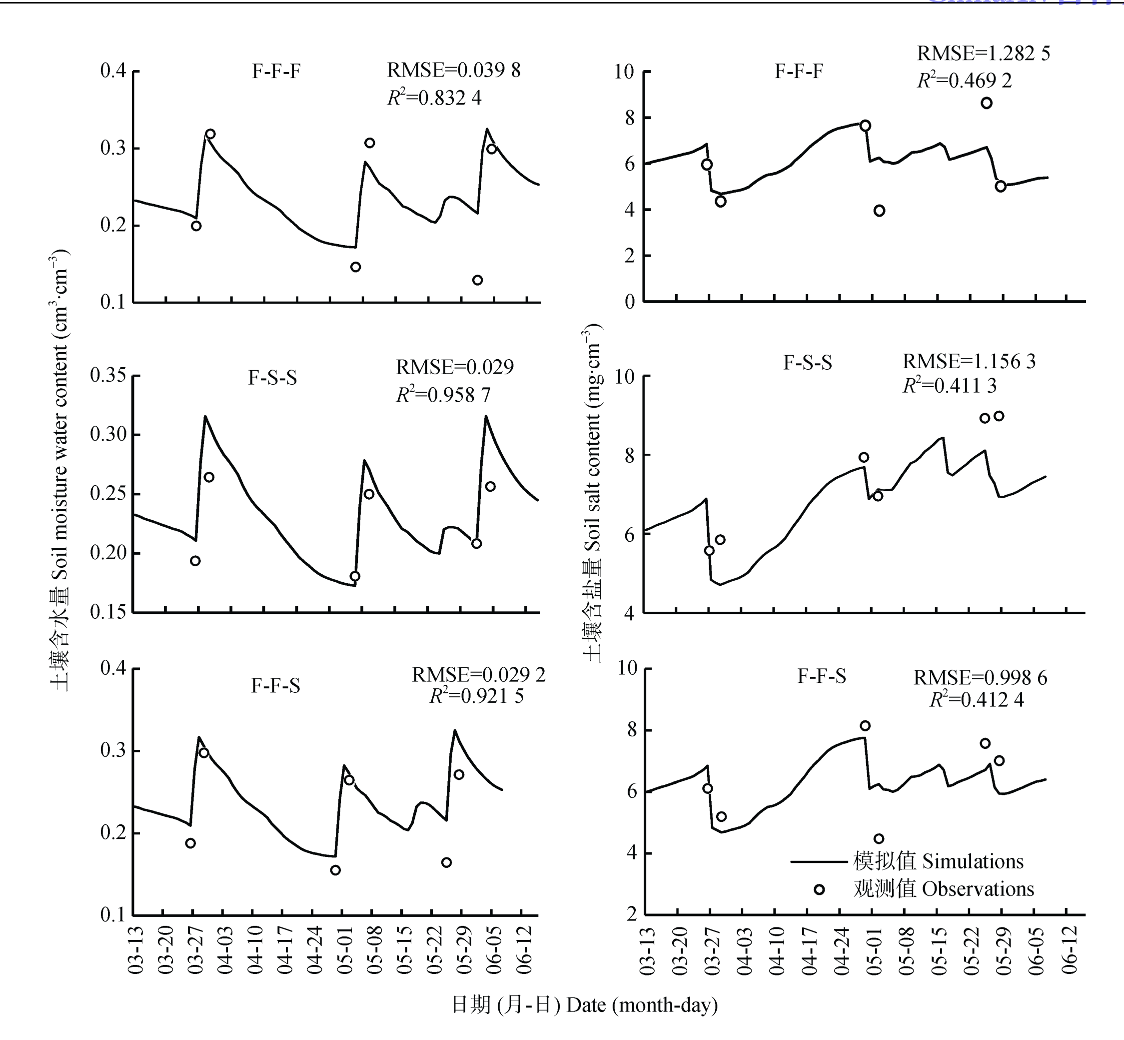


图 2 2005 年不同灌溉方式模拟值和实测值水分和盐分验证结果(F: 淡水灌溉, 灌溉水矿化度为 0.84 g·L⁻¹; S: 咸水灌溉, 灌溉水矿化度为 3.0 g·L⁻¹; 3 次灌水时间分别为拔节期、抽穗期和灌浆期)

Fig. 2 Comparison between the simulated and measured water contents and salt contents at different irrigation modes during the validation in 2005 (F: fresh water irrigation, water salinity is 0.84 g·L⁻¹; S: saline water irrigation, water salinity is 3.0 g·L⁻¹; Three times irrigation were respectively at jointing stage, heading stage and grain filling stage)

为小麦播前灌水(仅 2007—2008 年需要播前灌水)、抽穗水(60 mm)和玉米出苗水。从图 3 看出, 由于 2008 年、2010 年、2011 年属于平水年型, 结合夏玉米出苗水的洗盐用水量比较大, 大部分都在 120 mm。而 2009 年、2012 年、2013 年属于丰水年型, 受到降雨条件的影响, 洗盐水用量较少, 以 3 g·L⁻¹ 为例, 3 年夏玉米洗盐水用量分别为 0 mm、120 mm 和 30 mm。为使夏玉米在苗期的根区盐分浓度在耐盐阈值以下, 淡水用量亦随着咸水浓度的增加而增加, 这可以从第 6 年的淡水用量变化趋势看出。2 g·L⁻¹、3 g·L⁻¹、4 g·L⁻¹ 和 5 g·L⁻¹ 4 个处理 6 年平均结合夏玉米出苗水的洗盐用水量分别为 64 mm、101 mm、105 mm 和 118 mm(图 4)。

2)实际蒸散发

冬小麦分别经过 2~5 g·L⁻¹ 4 种灌溉处理后, 实际蒸散量并不随灌水浓度变化, 说明冬小麦受到盐分胁迫影响较小。冬小麦蒸散量年际间的变化主要是受生育期降雨量的影响。例如, 2009—2010 年和 2010—2011 年冬小麦生育期降雨量分别为 124.8 mm 和 63.9 mm, 而蒸散量分别为 474 mm 和 409 mm。但是夏玉米蒸散量受盐分胁迫的影响更明显, 尤其是在平水年型 2010—2011 年, 2~5 g·L⁻¹ 的蒸散量分别从 363 mm 和 342 mm 下降至 351 mm 和 325 mm (图 5)。

3)盐分累积增加量

在 2007—2011 年期间, 随着灌溉咸水浓度的增加, 土体积盐量增加, 并且随着时间的推移每个处理盐分累积量增加。而在 2012—2013 年期间(丰水年), 由于受强降雨洗盐的作用, 盐分累积增加量开始减小, 并经过两年降雨淋洗过程, 最终使土壤积盐量大幅减小(图 6)。在 2 g·L⁻¹、3 g·L⁻¹、4 g·L⁻¹、5 g·L⁻¹ 咸水灌溉处理下 2 m 土体单位面积的最终积盐量分别为 25.36 mg·cm⁻²、–4.88 mg·cm⁻²、28.24 mg·cm⁻²

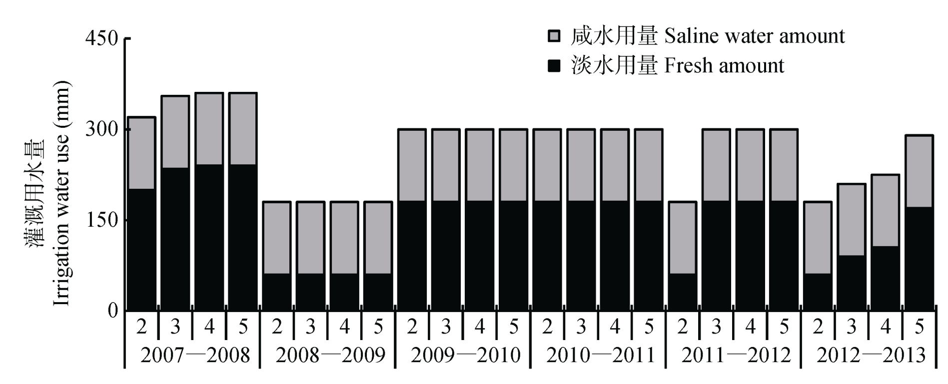


图 3　灌溉情景Ⅰ下 2007—2013 年冬小麦–夏玉米不同盐分浓度咸水灌溉下的灌溉用水量

Fig. 3　Irrigation amounts of winter wheat-summer maize under different irrigation water salt concentrations in 2007–2013 under irrigation scenario Ⅰ

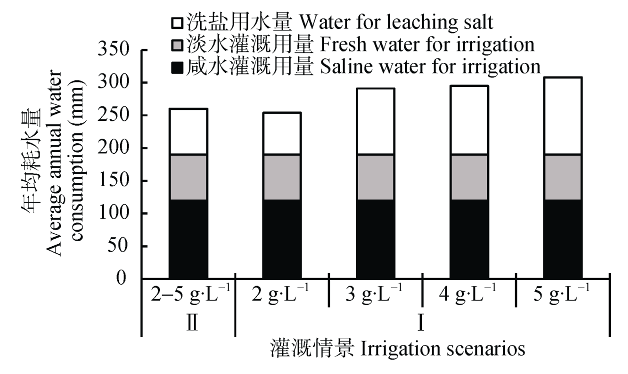


图 4　不同灌溉情景下冬小麦–夏玉米年均耗水用量

Fig. 4　Average annual water consumption of winter wheat-summer maize under different irrigation scenarios

和 12.82 mg·cm^{-2}。除了 3 g·L^{-1} 处理下土体脱盐，其他都有轻微积盐现象。2 g·L^{-1} 处理没有脱盐的原因是结合出苗水的洗盐用水量较小(64 mm)。

4)2 m 土壤剖面盐分浓度变化

从图 7 中可以看出，盐分的累积主要发生在 1 m 土体以下，这是因为经过灌溉和降雨的淋溶作用，表层大部分盐分随水分迁移至下层土壤。并且灌水浓度越大，下层土壤盐分含量越高，积盐越明显。0~100 cm 土体盐分含量较低。在每年的 6 月份至第 2 年的 4 月份始终维持在 4 g·L^{-1} 以下。经过拔节期和灌浆期两次咸水灌溉后土壤盐分含量明显增加，加上强烈的蒸散作用造成土壤盐分不断上移，4 月份至 6 月份是土壤盐分浓度最大的时间，峰值在 8 g·L^{-1} 以上。下层土壤(100~200 cm)盐分浓度随时间不断升高，且积盐区不断扩大，高浓度区域(9 g·L^{-1} 左右)在前 5 年呈现逐渐上移趋势，尤其在 4 g·L^{-1} 和 5 g·L^{-1} 咸水浓度处理时比较突出，在 2008—2012 年期间，9 g·L^{-1} 浓度区域边界从 140 cm 上升至 100 cm。在 2012—2013 年，受降雨影响，土体开始有明显脱盐趋势，高浓度盐分区在 2013 年玉米季末下降至 180 cm 以下。

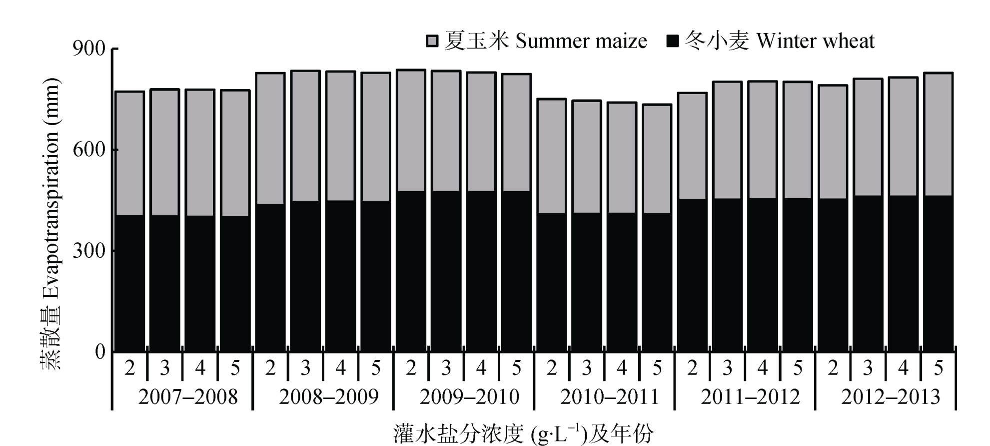


图 5　情景Ⅰ下 2007—2013 年冬小麦–夏玉米不同不同盐分浓度咸水灌溉下的实际蒸散发

Fig. 5　Actual evapotranspiration (ET) of winter wheat-summer maize under different irrigation water salt concentrations in 2007–2013 under irrigation scenario Ⅰ

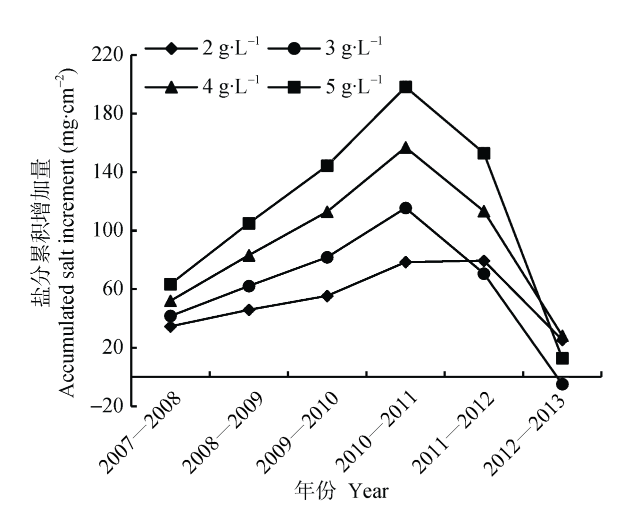


图 6 情景 I 下不同年份不同盐分浓度咸水灌溉下土壤盐分累积增加量(2 m 土体)

Fig. 6 Accumulated soil salt increment under different irrigation water salt concentrations (2 m soil profile) in different years under irrigation scenario Ⅰ

2.2.2 情景 II

1)灌溉用水量

此情景是南皮现有的微咸水灌溉模式及洗盐方式，即越冬期灌溉 2 g·L^{-1} 微咸水，在拔节期灌溉咸水(有 2 g·L^{-1}、3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1}、5 g·L^{-1} 4 个处理)，开花期灌溉淡水，玉米出苗水每年均为 70 mm。冬小麦除第 1 年播前灌溉 60 mm 淡水外，其余年份只在开花期灌溉淡水，夏玉米除第 2 年播前有降雨外，其余年份均灌溉出苗水 70 mm，即每年淡水消耗量为：2007—2008 年淡水用量 190 mm，2008—2009 年淡水用量为 60 mm，其余 4 年淡水用量为 130 mm；每年的咸水用量均为 120 mm。多年平均结合出苗水的洗盐用水量和咸、淡灌水量见图 4。

2)实际蒸散发

情景 II 的蒸散量随灌溉水盐分浓度和水文年型变化的趋势和情景 I 类似，即小麦受盐分胁迫影响

图 7 情景 I 下 2007—2013 年不同时期冬小麦–玉米轮作系统土壤剖面含盐量变化

Fig. 7 Soil profile salt concentrations of winter wheat-summer maize system under irrigation scenario Ⅰ from 2007 to 2013

不明显，在不同年份的变化受降雨的影响；玉米受盐分胁迫的影响较大，尤其是在 2010 年和 2011 年随盐分浓度的增加蒸散量降低(图 8)。

3)盐分累积增加量

4 个处理 2 g·L^{-1}、3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1}和 5 g·L^{-1} 6 年后盐分累积增加值分别为–62.29 mg·cm^{-2}、–38.32 mg·cm^{-2}、–15.49 mg·cm^{-2}和 5.90 mg·cm^{-2}。2~4 g·L^{-1}处理 2 m 土体能够脱盐，5 g·L^{-1}处理则有轻微积盐。总体来看，在情景 II 灌溉制度下，4 种咸水灌溉处理后 2 m 土体基本不积盐(图 9)。

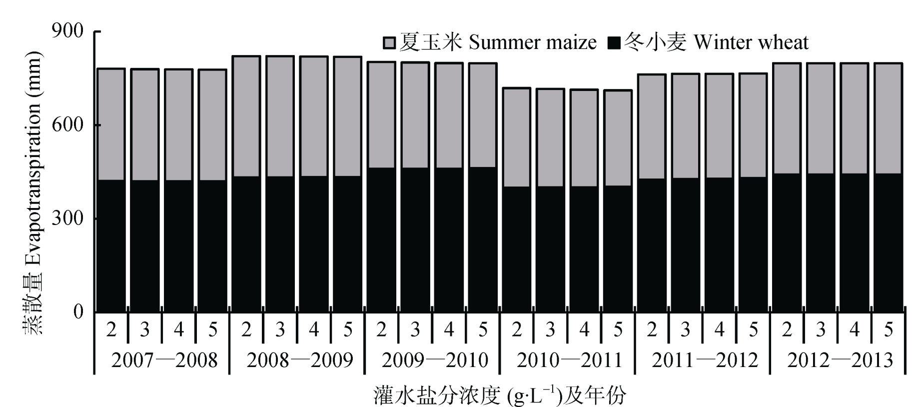


图 8　情景 II 下 **2007—2013** 年冬小麦–夏玉米不同盐分浓度咸水灌溉下的实际蒸散发

Fig. 8　Actual evapotranspiration (ET) of winter wheat-summer maize under different irrigation water salt concentrations in 2007—2013 under irrigation scenario II

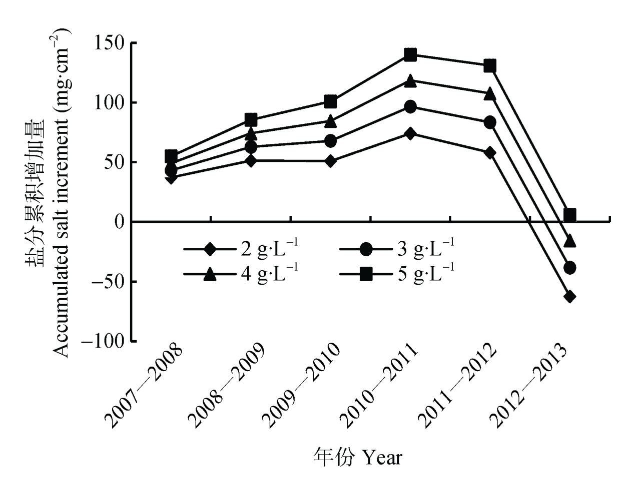


图 9　情景 II 下不同年份不同盐分浓度咸水灌溉下土壤盐分累积增加量**(2 m** 土体**)**

Fig. 9　Accumulated soil salt increment under different irrigation water salt concentrations (2 m soil profile) in different years under irrigation scenario II

4)2 m 土壤剖面盐分浓度变化

上层土体(0~100 cm)盐分含量基本维持在 2 g·L^{-1}左右，出现峰值的时间段在每年的 4 月份至 6 月份。从年际变化来看，2008—2012 年下层土体(100~200 cm)盐分浓度逐渐升高，但高浓度区域(10 g·L^{-1}左右)没有明显上移，保持在 120 cm 以下。从年内变化来看，每年的 6 月份至翌年的 4 月份，100~160 cm 区域盐分浓度具有持续下降趋势(图 10)。总体来看，情景 II 模式上层土体(0~100 cm)盐分含量更低且下层积盐区更稳定。

3　讨论与结论

3.1　不同水文年型下土壤水盐动态变化

土体是否积盐关键在于脱盐量，而土体的脱盐量主要受到自然降雨的影响。在 2008—2013 年 6 年模拟时段，冬小麦季每年都处于积盐状态，洗盐主要发生在夏玉米季。其中，在平水年型 2008 年、2010 年和 2011 年夏玉米季都在积盐；在丰水年型 2009 年、2012 年和 2013 年夏玉米季都在洗盐且玉米洗盐水用量依次增大。土体洗盐用水量与底部水分渗漏量密切相关，以情景 II 为例，2009 年玉米季渗漏量为 13 mm，最大渗漏量可达 0.055 cm·d^{-1}；2012 年和 2013 年玉米季渗漏量分别为 50 mm、109 mm，最大渗漏量分别为 0.14 cm·d^{-1}和 0.61 cm·d^{-1}。由此可见，土体明显脱盐现象主要发生在 2012 年和 2013 年玉米季。

土体是否产生渗漏主要决定于这个时期的降雨量和蒸散量。2009 年最大降雨强度发生在 8 月份(表 5)，洗盐过程主要发生在 9 月份；2012 年和 2013 年最大降雨强度都在 7 月份，而土体洗盐过程发生在 8 月、9 月份，由此说明，土体发生洗盐的时间滞后于最大雨强发生时间。根据玉米需水量规律变化可知，土壤蒸发量和作物蒸腾量分别在 6 月份、8 月份最高(图 11，以 2009 年为例)，说明玉米在这两个月份需水量最大，如果降雨量集中在这两个月份，土体产生的渗漏量可能偏小且持续时间短；如果降雨集中在 7 月份或 9 月份，受到玉米耗水量较少的影响，

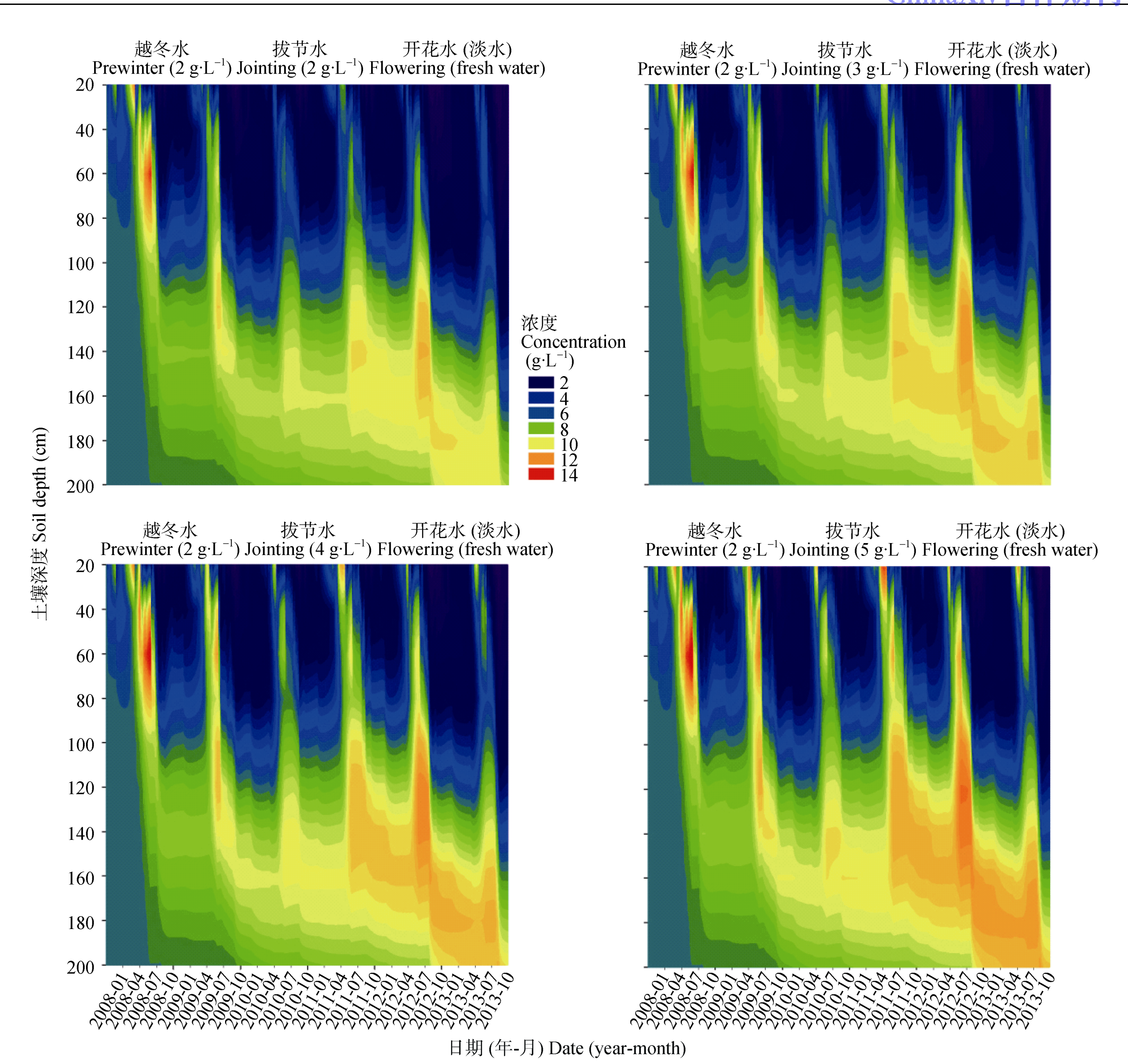


图 10 情景 II 下 2007—2013 年不同时期冬小麦–玉米轮作系统土壤剖面含盐量变化

Fig. 10 Soil profile salt concentrations of winter wheat-summer maize system under irrigation scenario II from 2007 to 2013

表 5 河北省南皮县丰水年型夏玉米季不同月份降雨量

Table 5 Precipitation in different months during summer maize growth period in wet years in Nanpi County of Hebei Province mm

年份 Year	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	全年 Year
2009	160.8	112.2	173.8	107.9	779.5
2012	49.0	269.9	95.0	97.6	674.7
2013	51.0	295.6	168.8	44.4	658.1

土体产生的渗漏量可能较大且持续时间长。相对于 9 月份，7 月份强降雨的洗盐效果更好，原因是 8 月份的降雨量远远大于 10 月份，而洗盐时间具有滞后性并需要一定强度的连续降雨。

3.2 不同矿化度咸水灌溉对土壤剖面盐分分布和洗盐效果的影响

两种情景土壤剖面共同的特点：在 2008—2011 年期间(积盐时间)，下层土体(100~200 cm)土壤盐分浓度在 8 g·L^{-1} 以上并随时间不断增大；上层土体(0~100 cm)在每年 7 月份至次年 3 月份土壤盐分浓度基本维持在 2 g·L^{-1} 左右，基本能保证夏玉米的正常生长。5 月中下旬出现短暂峰值现象可达 8 g·L^{-1} 以上，此时正值冬小麦灌浆末期，受盐分胁迫影响较大。因此咸水灌溉需要注意两点：一是控制下层土体(积盐区)盐分累积，过多则不利于雨季脱盐；二是冬小麦灌浆末期上层土壤盐分浓度不宜过高(6 dS·m^{-1} 以上影响小麦生长)，否则不仅会影响小麦产量，也会使玉米播后洗盐水用量增加，不利于节水。

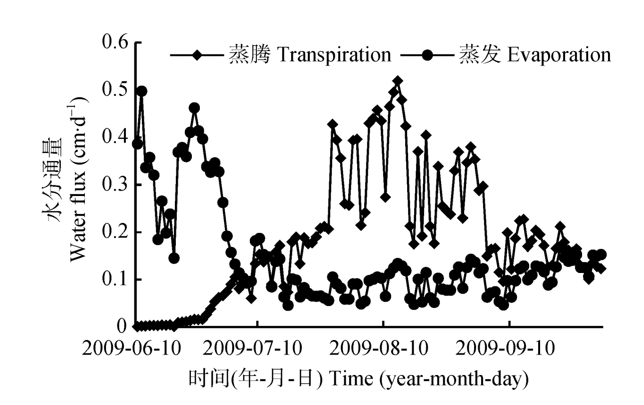


图 11　2009 年夏玉米实际蒸腾量和土壤蒸发量

Fig. 11　Actual transpiration and soil evaporation of summer maize in 2009

情景Ⅰ中, 4 g·L^{-1}两次咸水灌溉和 5 g·L^{-1}两次咸水灌溉处理下, 下层土体积盐过多(在冬小麦灌浆末期上层土壤盐分浓度过高达 9.1 dS·m^{-1}), 导致土体盐分不能在后期丰水年型玉米季淋洗掉。尤其在平水年型 2010—2011 年结合出苗水的洗盐用水量达到 120 mm, 但是洗盐效果仍然不是太好, 玉米苗期根区土壤盐分浓度为 3 dS·m^{-1}左右, 还是在玉米耐盐阈值(1.7 dS·m^{-1})以上。因此, 这两种咸水灌溉模式不利于作物正常生长。2 g·L^{-1}和 3 g·L^{-1}两次咸水灌溉处理土壤盐分浓度基本控制在作物耐盐阈值以下。从节水角度考虑, 3 g·L^{-1}所需的年均结合出苗水的洗盐用水量(101 mm)比 2 g·L^{-1}所需的年均洗盐用水量(64 mm)大, 因此, 情景Ⅰ中的 2 g·L^{-1}两次咸水灌溉处理是可持续灌溉方案。情景Ⅱ中, 由于在越冬期进行一次微咸水(2 g·L^{-1})灌溉, 而后只在拔节期进行一次 2~5 g·L^{-1} 咸水灌溉, 这种模式相对来说下层积盐量少, 经过后期丰水年降雨量大的影响, 2 g·L^{-1}、3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1}一次咸水灌溉处理下的土体都能够脱盐, 5 g·L^{-1} 处理则有轻微积盐且灌浆期末出现的浓度峰值在 9 dS·m^{-1}以上。由于每年玉米季播后设置固定出苗水用量 70 mm, 在这种连续定量洗盐模式下, 玉米苗期至小麦返青阶段(每年 7 月至次年 3 月份), 下层土壤在 100~120 cm 附近处, 盐分浓度有一定程度的下降趋势, 逐渐从 8 g·L^{-1}下降至 4 g·L^{-1}左右, 说明情景Ⅱ模式盐分比较容易淋洗。

3.3　结合出苗水的洗盐用水量对土体盐分淋洗的影响

玉米季的脱盐量除了受水文年型影响, 还受到人工洗盐的影响。在同一水文年型且洗盐用水量相同情况下, 4 种不同咸水浓度处理下的玉米季脱盐量基本一致(如表 6 所示); 而在同一水文年型不同洗盐用水量情况下, 土体脱盐量随着洗盐用水量的增加而增加, 尤其在丰水年型玉米播后结合出苗水进行灌溉洗盐更有利于让土体脱盐, 比如情景Ⅰ中, 2012 年 2 g·L^{-1}和 3 g·L^{-1} 2 次咸水灌溉处理下的玉米洗盐水用量分别为 0 mm 和 120 mm, 对应的玉米季土体脱盐量分别为 15.51 mg·cm^{-2}和 75.51 mg·cm^{-2}; 在 2013 年土体脱盐量与洗盐用水量正相关关系更明显, 2 g·L^{-1}、3 g·L^{-1}、4 g·L^{-1}、5 g·L^{-1} 2 次咸水灌溉 4 种处理下洗盐用水量分别为 0 mm、30 mm、45 mm、110 mm, 而对应的土体脱盐量随洗盐量增加效果显著, 分别为 58.61 mg·cm^{-2}、79.38 mg·cm^{-2}、98.08 mg·cm^{-2}、162.11 mg·cm^{-2}。因此, 玉米季播后结合出苗水灌溉洗盐对土壤脱盐非常关键, 即使在丰水年也非常必要。

表 6　情景Ⅱ下不同盐分浓度咸水灌溉的玉米季土体脱盐量

Table 6　Soil salt leakage under different salt concentrations of irrigation water in summer maize period under scenarios Ⅱ

mg·cm^{-2}

灌溉水盐分浓度 Salt concentration of irrigation water (g·L^{-1})	2008	2009	2010	2011	2012	2013
2	3.31	−7.96	3.75	5.12	−34.59	−99.99
3	3.26	−8.31	3.64	5.08	−36.67	−105.72
4	3.20	−8.75	3.50	5.03	−39.28	−111.38
5	3.12	−9.30	3.29	4.96	−42.20	−117.24
标准差 Standard deviation	0.08	0.58	0.20	0.07	3.30	7.41

本文综合提出微咸水灌溉方案的适宜条件和适宜制度: 1)冬前浇灌 2 g·L^{-1}越冬水, 春后在拔节期浇灌一次 2~4 g·L^{-1}咸水; 2)冬前不灌越冬水, 春后分别在拔节期和灌浆期浇灌 2 g·L^{-1}咸水。两种灌溉模式年均结合出苗水的洗盐用水量(60~70 mm)均小于咸水灌溉用量(120 mm), 且总耗水量(250~260 mm)较小, 在节水角度上提高了微咸水资源的可持续利用潜力。

参考文献 References

[1] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 890–897
Qian Y, Zhang Z J, Fei Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890–897

[2] 张兆吉. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 362–370
Zhang Z J. Study and Assessment on Sustainable Utilization of Groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Geological

Publishing House, 2009: 362–370
[3] 逄焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 599–603
Peng H C, Yang J S, Yan H J. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(6): 599–603
[4] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 微咸水非充分灌溉对冬小麦生长发育及夏玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 579–585
Chen S Y, Zhang X Y, Shao L W, et al. Effect of deficit irrigation with brackish water on growth and yield of winter wheat and summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 579–585
[5] 马洪波, 宁运旺, 陈杰, 等. 不同基因型小麦品种(系)的耐盐性评价[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1049–1054
Ma H B, Ning Y W, Chen J, et al. Evaluation on salt tolerance of different genotypes of wheat cultivars (strains)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1049–1054
[6] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25(2): 239–250
[7] Munns R, Rawson H M. Effect of salinity on salt accumulation and reproductive development in the apical meristem of wheat and barley[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 2004, 26(5): 459–464
[8] Ayers R S, Westcot D W. Water Quality for Agriculture[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 29. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976
[9] 姚正培, 孟军, 李冠. 玉米自交系芽苗期耐盐性的鉴定与筛选[J]. 华北农学报, 2007, 22(5): 27–30
Yao Z P, Meng J, Li G. Salinity tolerance identification and screening of maize inbreeds in seedling emergence stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2007, 22(5): 27–30
[10] Rhoades J D, Kandiah A, Mashali A M. The Use of Saline Waters for Crop Production[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 48, Rome: FAO, 1992
[11] Karimov A K, Šimůnek J, Hanjra M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia)[J]. Agricultural Water Management, 2013, 131: 57–69
[12] Zeng W Z, Xu C, Wu J W, et al. Soil salt leaching under different irrigation regimes: Hydrus-1D modelling and analysis[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(1): 44–58
[13] Šimůnek J, Šejna M, Van Genuchten M T. The hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media[R]. Golden, Colorado: U. S. Salinity Laboratory, 1998
[14] 丁鼎治. 河北土种志[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1992
Ding D Z. Hebei Soil Species[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing, 1992
[15] 叶海燕, 王全九, 刘小京. 冬小麦微咸水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 27–32
Ye H Y, Wang Q J, Liu X J. Slight saline water irrigation systems for winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 27–32
[16] 方生, 陈秀玲. 浅层地下咸水利用与改造的研究[J]. 河北水力科技, 1999, 20(2): 6–11
Fang S, Chen X L. Study on the utilization and transformation of shallow groundwater[J]. Hebei Hydraulic Science and Technology, 1999, 20(2): 6–11
[17] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Journal of Applied Physics, 1931, 1(5): 318–333
[18] Van Genuchtenn M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898
[19] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978
[20] Wesseling J G, Elbers J A, Kabat P, et al. SWATRE: Instructions for Input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands[M]. Lahore, Pakistan: International Water Logging and Salinity Research Institute, 1991
[21] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.17[R]. Riverside, California, USA: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2013: 15–18
[22] 张喜英. 作物根系与土壤水利用[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 34–45
Zhang X Y. Crop Root System and Soil Water Utilization[M]. Beijing: Meteorological Press, 1999: 34–45
[23] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: FAO, 1998
[24] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 60–63
Duan A W, Sun J S, Liu Y, et al. Irrigation Water Quota of Main Crops in North China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2004: 60–63
[25] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972, 8(5): 1204–1213
[26] 吴忠东, 王全九. 黄淮海平原冬小麦对盐分胁迫的响应研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 99–104
Wu Z D, Wang Q J. Response to salt stress about winter wheat in Huanghuaihai Plain[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(12): 99–104
[27] 张喜英, 陈素英, 裴冬, 等. 秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6): 583–592
Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, et al. Evapotranspiration, yield and crop coefficient of irrigated maize under straw mulch conditions[J]. Progress in Geography, 2002, 21(6): 583–592
[28] Belmans C, Wesseling J G, Feddes R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE[J]. Journal of Hydrology, 1983, 63(3/4): 271–286
[29] Hay R K M, Porter J R. The Physiology of Crop Yield[M]. 2nd ed. Oxford, UK: Blackwell Pub., 2006
[30] Childs S W, Gilley J R, Splinter W E. A simplified model of corn growth under moisture stress[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(5): 858–865
[31] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 等. 亏缺灌溉对冬小麦生理生态指标的影响及应用[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1086–1090
Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Effects of deficit irrigation on physio-ecological indices of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1086–1090
[32] 杨萌, 冯宇鹏, 林倩, 等. 近30年吴桥县冬小麦生育期水分亏缺变化趋势分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 482–489
Yang M, Feng Y P, Lin Q, et al. Study on water deficit trend in the recent 30 years in Wuqiao County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 482–489
[33] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 71–76
Wu Z D, Wang Q J. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 71–76